

Artigo

Estudo de Ciclones e de Padrões de Circulação Atmosférica no Oceano Atlântico Sul Próximo à Costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Dados da Reanálise do Era-Interim

Fabio Pinto da Rocha, José Antonio Aravéquia, Bruno Zanetti Ribeiro

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.

Recebido: 25/11/2014 - Aceito: 12/8/2015

Resumo

O objetivo desta pesquisa é estudar os ciclones e os padrões de circulação atmosférica a eles associados no Oceano Atlântico Sul, próxima à costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, usando dados da Reanálise ERA-Interim nos meses de outubro a abril dos anos de 2003 a 2013. Foi desenvolvido um método objetivo para obter as datas, a localização e a intensidade dos ciclones, o que permitiu gerar compostos de algumas variáveis meteorológicas. Os resultados mostraram que em média ocorreram 17 casos de ciclones entre os meses de outubro a abril e que o período de vida dentro da região de estudo chegou até a 8 dias em alguns casos. O período de out/08 a abr/09 chama atenção por ter apresentado 27 casos. Os compostos para o período mostraram que a combinação de difluência no escoamento em altos níveis, associada a um cavado em médios níveis e a presença de anomalias positivas do vento zonal são favoráveis à formação de ciclones no Atlântico Sul, próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste do país. A convergência do escoamento em baixos níveis é decisiva para estimular a ciclogênese na região. O estudo de caso mostrou uma aplicação da ferramenta desenvolvida que pode ter utilidade no aperfeiçoamento dos modelos numéricos de previsão desse tipo de sistema meteorológico.

Palavras-chave: ciclones, ciclogêneses no Oceano Atlântico Sul, reanálise ERA-Interim.

Cyclones and Atmospheric Circulation Patterns Study in the South Atlantic Ocean Near the Coast of South and a Southeast of Brazil Using Reanalysis Era-Interim Data

Abstract

The main objective of this research is to study the cyclones, and the atmospheric circulation pattern associated with them, occurring in South Atlantic Ocean, using data from ERA-Interim Reanalysis from October to April in the 2003-2013 period. An objective method was developed and applied to identify the dates, location and intensity of cyclones, which allowed to generate composites of some meteorological variables. The results showed that, on average, 17 cases of cyclones occurred in the months from October to April and the life within the studied area reaches up to 8 days. The period of October/2008 to April /2009 calls attention for recording 27 cases. Composites for the entire period showed a combination of the diffluence in the flow at upper levels, associated with an mid-tropospheric trough and the presence of positive zonal-wind anomalies are favorable to formation of cyclone in the Atlantic Ocean near South and Southeastern Brazil. Convergence of low-level flow were decisive to stimulate cyclogenesis in the region. The case studied showed an application of the developed tool that can be useful in improving the numerical prediction models of this type of weather system.

Keywords: cyclones, cyclogenesis in the South Atlantic Ocean, Era-Interim reanalysis.

1. Introdução

Os ciclones surgem na circulação geral da atmosfera e são exemplos de sumidouros de energia térmica. Apesar dos ciclones surgirem e se desenvolverem dentro de fortes condições de instabilidade e geralmente se apresentarem com fortes ventos, seus ciclos de vida tem o objetivo de estabilizar e homogeneizar a atmosfera. Eles são classificados em extratropicais, subtropicais e tropicais, em função da região onde atuam, de seu ciclo de vida e da fonte de energia pela qual se mantêm. Como essas regiões possuem características muito diferentes, os processos de formação destes sistemas ciclônicos também são diferentes (Anthes, 1982; Gray, 1968; dentre outros).

Os ciclones extratropicais retiram sua energia dos contrastes horizontais de temperatura. Estes sistemas estão associados a sistemas frontais, onde há acentuado gradiente de temperatura e/ou de espessura entre os níveis de 500 e 1000 hPa e de temperatura de ponto de orvalho. Além disso, possui acentuado gradiente de pressão e apresentam o jato polar bem definido em 250 hPa associado à frente em superfície (Celesmin, 1997).

Por outro lado, as frentes subtropicais ou cavados baroclínicos possuem fraco gradiente de temperatura e/ou de espessura entre os níveis de 500 e 1000 hPa, fraco gradiente de pressão, significativo gradiente de água precipitável e ausência de jato polar associado diretamente, sendo mais comum a presença do jato subtropical (Sanders, 2005).

Ciclones tropicais, furacões ou tufões são a mesma denominação de sistemas de baixa pressão, sem sistemas frontais associados, que ocorrem sobre águas tropicais ou subtropicais, com temperaturas acima de 26,5 °C e fraco cisalhamento vertical dos ventos (definido como a magnitude da diferença do vento em 850 e 200 hPa abaixo de 8 m/s). Além disso, os ciclones tropicais têm como características a forma organizada das tempestades (simetria), o diâmetro típico da ordem de 300 a 800 km, e mínimo de pressão no centro, região que apresenta céu claro e ventos fracos e é denominada de “olho do furacão” (Ahrens, 2005).

A maior parte dos ciclones não pertence aos tipos clássicos de tropicais ou extratropicais, apresentando comportamentos diferenciados, transitando entre esses dois extremos de forma contínua, e até mesmo começando sua evolução com configuração de um tipo e terminando com o tipo extremo oposto. Nessa linha é que pesquisadores como Beven (1997) citado por Pezza (2009) e Hart (2003), passaram a classificar esses tipos de ciclones como híbridos, podendo apresentar transições durante suas fases de vida.

A climatologia de ciclones na região do Atlântico Sul mostra que há regiões preferenciais de formação próximo à Patagônia Argentina e próximo à Bacia do Prata ao longo do ano, tanto nos estudos de Gan e Rao (1991) quanto de Guia (2011).

No verão, Gan e Rao (1991) apontaram para um máximo de densidade ciclogênica na região da Patagônia Argentina, e um segundo máximo próximo à Bacia do Prata. Guia (2011) verifica também uma região ciclogênica com maior densidade sobre a Patagônia Argentina, mas o segundo máximo ocorre entre o litoral das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, sobre o Oceano Atlântico. Segundo Cavalcanti *et al.* (2009), no verão, o efeito baroclínico é a mais importante contribuição na fase de desenvolvimento dos ciclones. No seu estudo, Hoskins e Hodges (2005) constataram que a maioria das ciclogêneses em baixos níveis no Hemisfério Sul provavelmente está associada a ondas preexistentes na média e na alta troposfera. Eles ressaltaram que a influência da orografia e a liberação de calor latente podem ser fatores importantes no processo de ciclogênese em baixos níveis na região subtropical. Por outro lado, o trabalho de Murray e Simmonds (1991) conclui que ocorre um máximo de atividade ciclônica durante o verão na costa leste da América do Sul, entre as latitudes de 20° S e 30° S.

Os ciclones que se formam na costa sul/sudeste do Brasil deslocam-se para leste ou sudeste com velocidade média de 9 m/s, percorrem distâncias de aproximadamente 2700 km, possuem tempo de vida médio de 3 dias e nessas ciclogêneses, a presença de umidade exerce grande importância (Reboita *et al.*, 2009). Como salienta Cardoso *et al.* (2012) em seu estudo, o leste da Região Sul do país é influenciada pela atuação de ciclones extratropicais que acarretam impactos sócio-econômicos associados à ocorrência de precipitação, ventos fortes e agitação marítima. Os impactos podem ser maiores quando da ocorrência de ciclones tipo “explosivos”, que, segundo Bitencourt *et al.* (2011), apresentam queda de pressão central superior a 1 hPa por hora em 24 h e tem maior frequência nos meses mais frios, de junho a agosto, com início da trajetória com desenvolvimento explosivo pelo oceano e ao sul de 27° S.

A principal motivação para o estudo de ciclones e dos padrões de circulação atmosférica na região do Atlântico Sul próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste nos meses de outubro a abril de 2003 a 2013 é melhorar a previsão de tempo, incluindo o aperfeiçoamento de modelos numéricos de previsão. Estas melhorias permitem ações no sentido de minimizar perdas de vidas e de recursos, uma vez que sua atuação direta de ciclones ou a consequente intensificação de outros sistemas meteorológicos na região podem impactar severamente a população e atividades econômicas dessas importantes regiões do país.

Assim, o objetivo desta pesquisa é estudar os ciclones e os padrões de circulação atmosférica a eles associados no Oceano Atlântico Sul, próxima à costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, usando dados da Reanálise ERA-Interim nos meses de outubro a abril dos anos de 2003 a 2013.

2. Material e Métodos

2.1. Metodologias utilizadas em trabalhos anteriores para identificação de ciclones

Gan e Rao (1991) utilizaram quatro cartas sinóticas diárias e imagens de satélites para o período de jan/1979 a dez/1988, e dados mensais de 08 estações de radiossondagens. A existência de um ciclone foi considerada quando houvesse pelo menos uma isóbara fechada, traçada com um intervalo de 2 Mb. O sistema de baixa pressão deveria persistir por pelo menos em quatro cartas consecutivas e para o início da ciclogênese, considerou-se o horário da carta em que apareceu a primeira isóbara fechada. Por outro lado, Sinclair (1997) em seu estudo, usou o campo de geopotencial em dois horários diários, por pelo menos dois dias (quatro ou mais análises) fornecidos pelo ECMWF durante o período de 1980 a 1994.

Hart (2003) usou como critérios para identificação de ciclones a existência de um mínimo local de pressão inferior a 1020 hPa dentro de uma área de $5^\circ \times 5^\circ$, o tempo de vida de pelo menos 24 horas (visando evitar dados espúrios). Adotou também o gradiente de pressão ao nível médio do mar superior a 02 hPa dentro da área de $5^\circ \times 5^\circ$, a fim de evitar numerosos mínimos de pressão num campo de pressão geralmente uniforme, sendo comparável ao utilizado pelo NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) para detecção de trajetória de ciclones tropicais (gradiente de pressão de 1 hPa).

Hoskins e Hodges (2005) apresentaram uma técnica de rastreamento dos ciclones através do algoritmo *Track* que se baseia em quatro etapas: aplicação de um filtro espectral passa banda, para remover ondas planetárias com número de ondas menor ou igual a 5; identifica os ciclones como anomalias negativas da vorticidade no nível escolhido; diagnostica se os pontos de grade tem as mesmas características dentro do mapa binário utilizado; e verifica o ponto de grade mais próximo com a mesma característica associando-o com a mesma trajetória e à otimização de uma função custo construída a partir de medidas de suavização da trajetória local.

Mendes *et al.* (2007) sugeriu identificar os ciclones a partir da verificação de isóbaras fechadas em uma área de $3^\circ \times 3^\circ$ de ponto de grade. Adotou também valor máximo de 1015 hPa para a pressão central do sistema de baixa pressão e gradiente médio da pressão de 0.55 hPa/250 km estimado em uma área de 5° de latitude por 7° de longitude.

Murray e Simmonds (1991) identificaram mínimos de pressão comparando os valores com pontos de grade da vizinhança e considerou um espaçamento de grade que tenha o valor máximo do laplaciano da pressão para identificação dos ciclones.

Seguindo o esquema objetivo de identificação dos ciclones proposto por Murray e Simmonds (1991), Pezza e Ambrizzi (2003) usaram o campo da pressão ao nível médio do mar a cada 12 h, adequado para séries climato-

lógicas, no período de 1973 a 1996, meses de junho a agosto no Hemisfério Sul, se utilizando de dados de reanálise do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) / NCAR (*National Center for Atmospheric Research*). Consideraram ainda pressão central das baixas, aqueles inferiores a 1015 hPa.

2.2. Dados utilizados e área de estudo

Neste trabalho, foi considerada a área de estudo limitada por 15° S e 35° S de latitude e 50° W e 30° W de longitude, sobre o Oceano Atlântico Sul, próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste do país, como mostra a Fig. 1.

O conjunto de dados usado neste estudo foi extraído da Reanálise ERA-Interim (Dee, 2011), desenvolvido pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) que é disponível desde 1979 até o presente. As reanálises do ERA-Interim envolvem a recuperação de informações coletadas sobre a superfície e sobre oceanos através de navios, aviões, radiossondas e satélites. Essas informações foram computadas por meio de um sistema de assimilação de dados que é mantido constantemente atualizado, sendo o atual o 4DVAR. Os avanços nas suas formulações aliadas à implementação de uma rede maior de dados observacionais e ao aumento na resolução horizontal, tornam as reanálises do ERA-Interim mais confiáveis em relação às reanálises anteriores do ECMWF (ERA-15 e ERA-40).

Ressalta-se ainda que no estudo desenvolvido por Quadro *et al.* (2012), das novas gerações de Reanálise, quais sejam, ERA-Interim do ECMWF, MERRA (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*) produzido pelo GSFC/NASA (*Goddard Space Flight Center/National Aeronautics and Space Administration*) e o CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), do NCEP, todas as reanálises representam bem o ciclo anual dos produtos de precipitação, mas o CFSR é o que mostra o

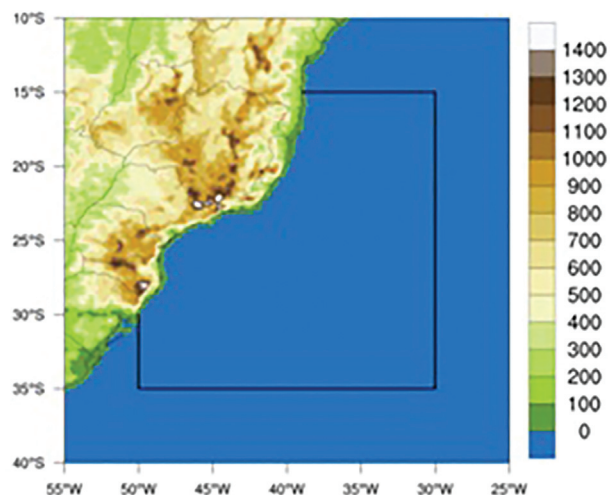


Figura 1 - Área de estudo destacada pelo quadrado (parte oceânica).

menor viés para todo o continente. Quadro *et al.* (2012) assinala ainda que o melhor desempenho dessa nova geração de reanálise deve-se ao fato de utilizarem modelos acoplados oceano-atmosfera, além da alta resolução espacial dos modelos e também a assimilação de radiâncias. Segundo Simmons *et al.* (2007) e Quadro *et al.* (2012), o maior avanço do ERA-Interim reside no sistema de assimilação de dados que usa o 4D-Var (com ciclos de 6 e 12 horas de assimilação), o que melhora substancialmente o desempenho da previsão, especialmente no Hemisfério Sul.

Também foram utilizados no presente estudo produtos específicos desenvolvidos pelo GPT (Grupo de Previsão do Tempo) do INPE/CPTEC (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), tais como figuras, gráficos, boletins técnicos, análises sinóticas, análise de eventos externos, dentre outros.

Para a detecção dos ciclones, utilizou-se o campo de pressão ao nível médio do mar da Reanalise ERA-Interim, com resolução horizontal de $0,5^\circ$ de latitude por $0,5^\circ$ de longitude e resolução temporal com intervalo de 12 h, considerando os horários sinóticos de 00 UTC e 12 UTC.

2.3. Método empregado

A metodologia utilizada é composta de alguns critérios para identificar os ciclones. O primeiro deles detecta um mínimo local de pressão ao nível médio do mar inferior a 1015 hPa associado a um gradiente médio de pressão de $0,4 \text{ hPa}/100 \text{ km}$ estimado em uma área $5^\circ \times 5^\circ$, semelhante aos critérios utilizados por Mendes *et al.* (2009). A razão da escolha do gradiente médio de $0,4/100 \text{ km}$ é devido ao fato de gradientes médios de valores mais altos, por exemplo, $0,8/100 \text{ km}$ e $1,0/100 \text{ km}$ não captarem uma quantidade significativa de casos de mínimos de pressão associados às isóbaras fechadas, apresentando “falsos” ciclones. Resumidamente, considerando o período de out/2012 a abr/2013, foram identificados os seguintes números de casos que atendem os critérios estabelecidos para diferentes gradientes médios:

Como podemos observar na Tabela 1, o uso de gradiente médio de $0,2/100 \text{ km}$ detectou apenas um caso a mais que o gradiente médio de $0,4/100 \text{ km}$. Em contrapartida, mostrou um considerável aumento de mínimos de pressão que não correspondem a isóbaras fechadas e à área

de estudo, “poluindo” os mapas. Ademais, nos eventos do “Furacão” Catarina em março de 2004 (Rocha, 2012 e Pezza, 2005) e a da enchente na Região Serrana do Rio de Janeiro em nov/2011 (INPE/CPTEC/2013), quando ocorreu a formação de um ciclone na costa da Região Sudeste associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), dentre outros casos selecionados não mostrados aqui neste estudo, foram melhor representados quando adotado o gradiente médio de $0,4/100 \text{ km}$ em comparação com os demais gradientes.

Outro critério considerado foi o tempo de vida do ciclone de pelo menos 24 horas, conforme Hart (2003) e ainda um intervalo de 12 horas (Pezza; Ambrizzi, 2003), nos horários sinóticos de 00 UTC e 12 UTC. Vale também ressaltar que respeitou-se o critério de isóbaras fechadas (Gan; Rao, 1991) associadas ao mínimo de pressão.

Para atender à identificação objetiva dos ciclones, desenvolveram-se rotinas com base nos dados disponíveis de pressão ao nível médio do mar oriundos da Reanálise ERA-Interim no período de estudo. A rotina avalia se a pressão em um ponto é menor que 1015 hPa, e posteriormente avalia se a pressão neste ponto é menor que a pressão nos outros pontos dentro da área de $5^\circ \times 5^\circ$. O número de pontos na grade é 121 (11×11 , com espaçamento de $0,5^\circ$), o que resulta em 120 excluindo o ponto em análise. Assim, quando os 120 pontos no entorno apresentam pressão maior que o ponto central, este ponto é um mínimo de pressão. É calculado então o gradiente médio de pressão na área de $5^\circ \times 5^\circ$. O gradiente é calculado em cada ponto por diferenças finitas, e o gradiente médio é obtido somando-se esses gradientes e dividindo pelo número de pontos na grade (121), respeitando o limite estipulado de $0,4 \text{ hPa}/100 \text{ km}$.

Satisfeitas as condições, mínimos de pressão são marcados com a letra “B” nos mapas na região de estudo, nos dias e horários sinóticos de ocorrência. Nesses mapas, também são plotadas as isóbaras, com intervalo de 2 hPa, conforme base de dados do ERA-Interim, campo de pressão ao nível do mar, com resolução horizontal de $0,5^\circ$ grau. A Fig. 2 ilustra um exemplo desta plotagem para o dia 11/01/2011 00 UTC.

A seguir, fez-se um agrupamento dos casos levando em consideração os critérios de permanência de isóbara fechada associadas aos mínimos de pressão na região de estudo por 24 h (três horários sinóticos de intervalo de 12 h consecutivos), gerando uma lista que contempla as datas, localizações e intensidades dos ciclones (não mostradas). A partir dessa lista, foram feitos compostos (médias) de campos de diversas variáveis meteorológicas usando dados de reanálise e estudo dos padrões de circulação.

A Fig. 3 ilustra resumidamente os passos descritos na metodologia na forma de um diagrama:

A análise de compostos de variáveis meteorológicas representam médias no período de tempo escolhidos e foram divididos em mensais, por temporada de outubro a

Tabela 1 - Número de casos de mínimos de pressão para diferentes valores de gradientes médios no período de out/12 a abr/13.

Gradientes médios/100 km	Números de casos
0,2	16
0,4	15
0,6	13
0,8	5
1,0	2

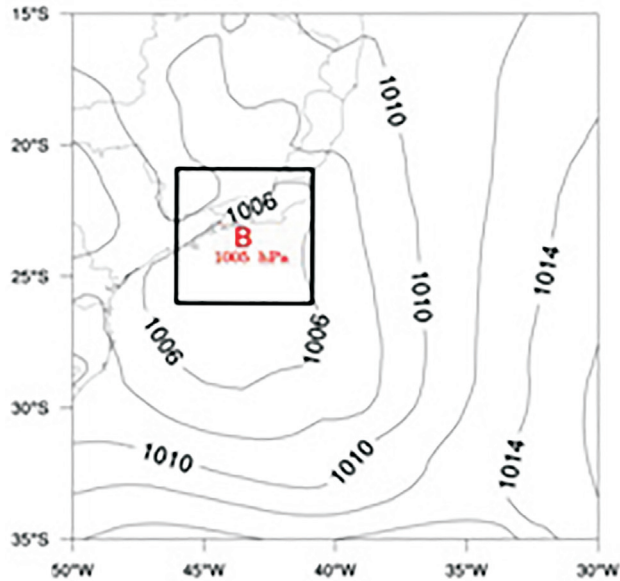


Figura 2 - Mínimo de Pressão segundo critério objetivo marcado pela letra B em vermelho e campo de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa) a partir da Renálise do ERA-Interim de 11/01/11 00 UTC.

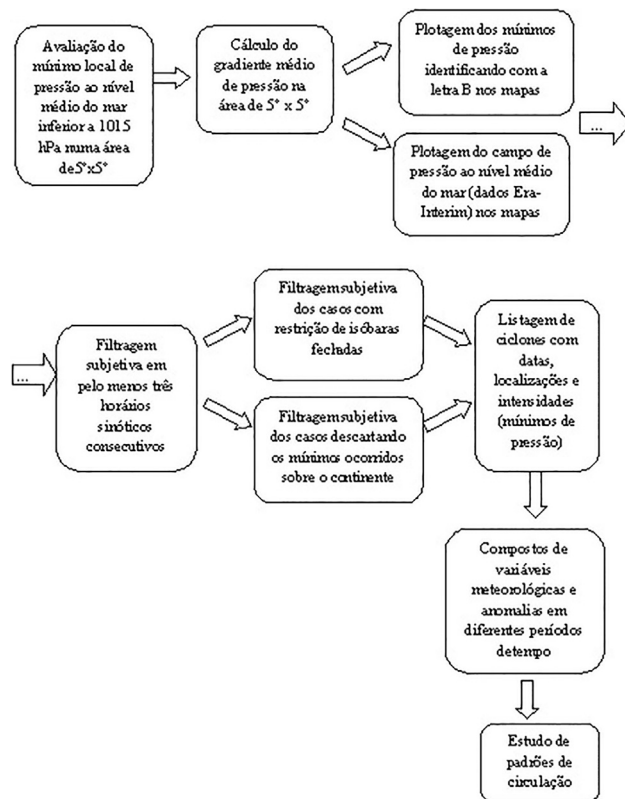


Figura 3 - Diagrama da metodologia utilizada.

abril, e total, englobando todos os casos de 2003 a 2013. As variáveis selecionadas foram pressão ao nível médio do mar (hPa), escoamento em 250, 500 e em 850 hPa (m/s), vorticidade relativa em 500 hPa (s^{-1}), assim como ano-

malias da pressão ao nível médio do mar (hPa), da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa e da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa. Foram feitas também análise dos campos um dia antes das datas de registro dos casos, sendo ilustrados neste trabalho o mês de dezembro e o mês de abril. As análises completas mensais e por temporadas outubro-abril nos 10 anos de estudo encontram-se disponíveis em Rocha (2014). Para calcular as anomalias mensais, subtraíram-se os compostos dos casos pelas climatologias mensais da reanálise ERA-Interim.

3. Resultados e Discussão

O tempo de vida dos ciclones dentro da área de estudo foi de pelo menos de 24 h (três horários sinóticos consecutivos, de 00 UTC e 12 UTC). O “Furacão” Catarina, no período de 20 a 28 de março durou 08 dias, e a tempestade tropical Anita de março de 2010 durou três dias e meio. Porém, vale ressaltar que estes dois casos tiveram uma duração maior que a média, que foi de 1,7 dias. No que se refere à intensidade, destacam-se os ciclones que ocorreram entre os dias 12 e 14/dez/2009 e entre os dias 07 e 08/abr/2010, que apresentaram valores do mínimo de pressão inferiores a 1000 hPa e a 990 hPa, respectivamente.

O número total foi de 169 ciclones, o que corresponde a uma média aproximada de 17 casos por temporada outubro/abril, como se vê na Tabela 2.

Notou-se uma frequência mais significativa de ciclones (27, contra uma média de 17), no período de out/2008 a abr/2009, e uma análise mais detalhada do comportamento sinótico é apresentada através da análise dos compostos da seção 3.1 a seguir. Por outro lado, observou-se uma diminuição na frequência de ciclones entre 2003 e 2004 (09 casos contra a média de 17). Vale ressaltar que nos períodos citados, em termos de circulação global, foram anos considerados de La Niña e de El Niño fraco respectivamente, como se pode notar na Fig. 4. No entanto, não há estudos conclusivos de impactos diretos dos fenômenos ENSO sobre ciclogêneses especificadamente sobre a limitada área de estudo e período de tempo abordado neste artigo.

3.1. Análise dos compostos

3.1.1. Análise período completo

Na análise total para a variável Pressão ao Nível Médio do Mar, de outubro a abril de 2003 a 2013 (Fig. 5a), fica caracterizada a formação de ciclones em torno de 25° S e 43° W, com valor médio da isóbara em 1012 hPa.

Na análise do nível de 850 hPa (Fig. 5b), o composto indicou um direcionamento do escoamento em direção à baixa pressão fechada em superfície. Já em 500 hPa (Fig. 5c), um cavado se situa desde o Oceano Atlântico até parte do Centro-Oeste do país, associado a uma área de anomalia negativa de vorticidade. Esse cavado é responsável pelo advecção de vorticidade para a região do Atlân-

Tabela 2 - Casos de ciclones por temporada.

Temporada de outubro a abril	Nº de casos (mínimo de 3 horários)	Nº de horários	Mínimo da pressão central
2003/2004	09	52	1008,35
2004/2005	16	78	1007,56
2005/2006	17	66	1008,55
2006/2007	10	56	1007,26
2007/2008	16	57	1009,25
2008/2009	27	108	1008,24
2009/2010	16	81	1006,33
2010/2011	23	97	1007,41
2011/2012	20	85	1006,50
2012/2013	15	61	1007,30
Média aproximada	17	74	1007,68

An analysis of the environmental energetics associated with the transition of the first South Atlantic hurricane.

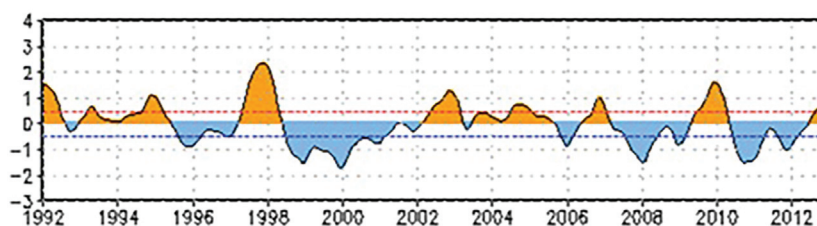


Figura 4 - Evolução do ONI (*Oceanic Niño Index*) de 1992 a 2012. Entre os valores -0,5 e +0,5, caracterizado Evento Neutro; valores do índice acima de +0,5, El Niño e valores abaixo de -0,5, La Niña. Fonte: NOAA/CPC, disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>.

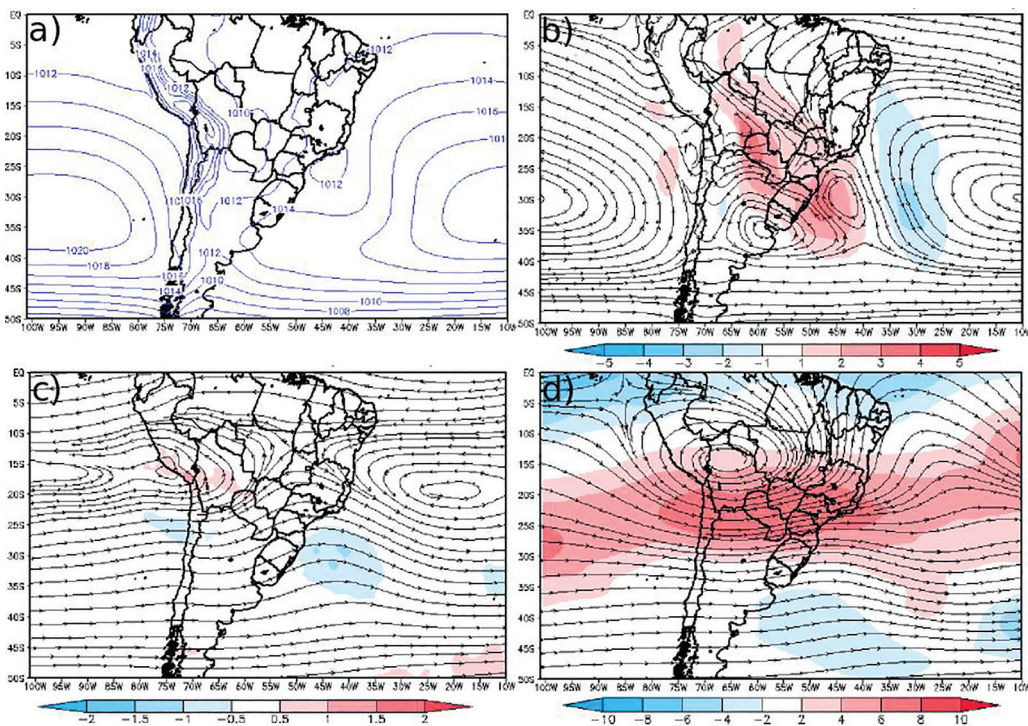


Figura 5 - a) Compostos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); b) Composto de Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional dos ventos (m/s) em 850 hPa; c) Linhas de Corrente (m/s) e anomalia da vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 500 hPa; d) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa, de outubro a abril, de 2003 a 2013.

tico Sul e seria um dos fatores responsável pela área ciclogênica próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste.

No campo médio do escoamento em altitude e da anomalia da componente zonal do vento (Fig. 5d), nota-se a presença de circulação anticiclônica próximo à Bolívia, associada à Alta da Bolívia que atua climatologicamente com mais intensidade nos meses de novembro a fevereiro. A Alta da Bolívia se associa ao Cavado do Nordeste. Outro ponto característico observado foi o escoamento zonal anormalmente mais forte e sobre parte da Argentina, Sul e Sudeste do Brasil o que ajuda a aumentar instabilidade em superfície, uma vez que estão relacionados ao cisalhamento do vento e a uma região de maior baroclinia.

Esse comportamento em altitude aliado à presença de cavado em níveis médios sobre Atlântico, e a convergência do escoamento em baixos níveis predominante nos casos estudados, como ilustraram os compostos dos períodos, ajudam a justificar a ciclogênese em superfície, como mostrado na Fig. 5.

3.1.2. Análise mensal específica

Nas Figs. 6 e 7 são mostrados os compostos para o mês de dezembro. Nota-se uma circulação ciclônica na

forma de cavado invertido nas isóbaras associada a uma região de anomalia negativa de pressão ao nível médio do mar sobre o Atlântico Sul (Fig. 6). O escoamento em baixos níveis foi direcionado ao Sudeste do país bem como ao Oceano Atlântico adjacente, fechando circulação ciclônica nesse nível. Nos níveis médios da troposfera (Fig. 7), verifica-se a presença de cavados mais aprofundados sobre a Região Sul do país e Oceano Atlântico adjacente, bem como áreas de vorticidade negativa (ciclônicas), o que também se observa na análise do dia anterior. Por outro lado, a anomalia da componente zonal do vento em altitude foi pequena em dezembro.

Os efeitos provocados pelo comportamento dos escoamentos ao longo da coluna troposférica, não foram suficientes para provocar o fechamento de baixas pressões em superfície, que apenas denotaram cavamentos no campo de pressão, considerando o espaçamento entre as isóbaras utilizadas neste trabalho.

Nos compostos dos meses de abril (que ainda reproduz algumas características da estação anterior, verão, mas se observa o início da redução gradativa dos volumes de chuva em parte do Sudeste e Centro-Oeste do país), ocorreram isóbaras fechadas nos campos médios de pressão ao

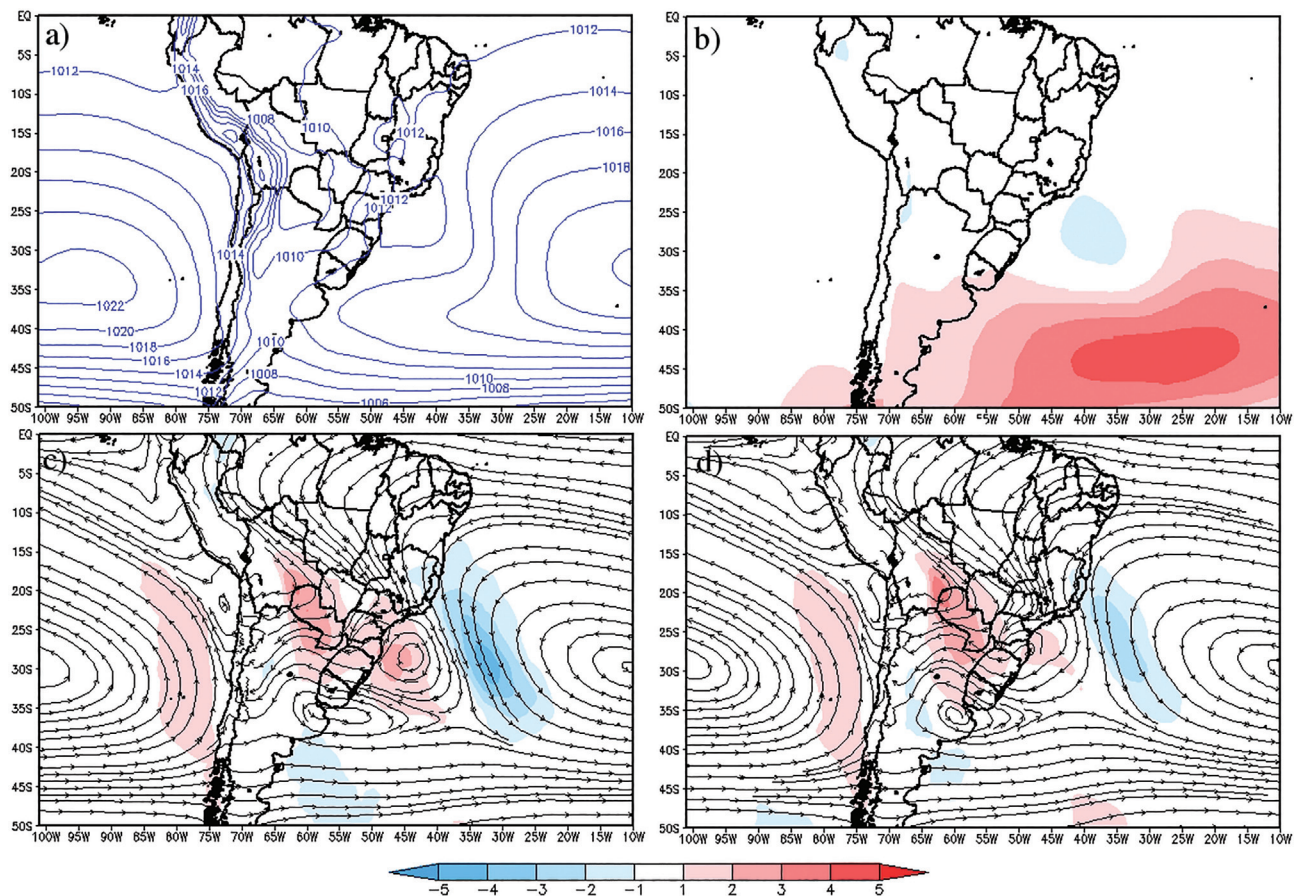


Figura 6 - a) Compostos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); b) Anomalia da Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); c) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa no dia e d) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa no dia anterior, para o mês de dezembro.

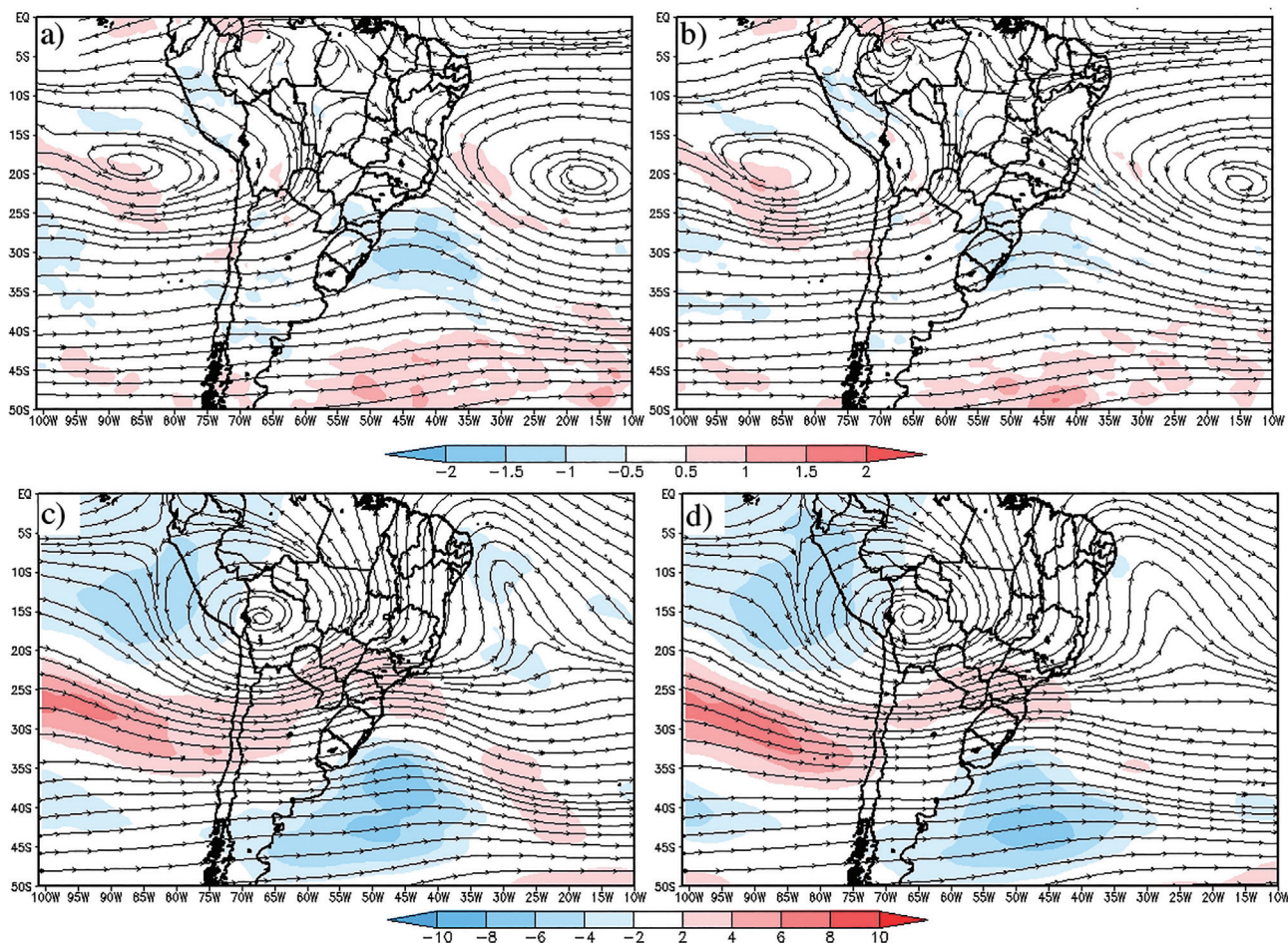


Figura 7 - a) Compostos de Linhas de Corrente(m/s) e anomalia de vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 500 hPa no dia; b) Compostos de Linhas de Corrente(m/s) e anomalia de vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 500 hPa no dia anterior; c) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa no dia e d) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa no dia anterior (d), para o mês de dezembro.

nível médio do mar, em uma área maior sobre o Atlântico Sul, próximo ao litoral do Sudeste do país e mais afastada da costa da Região Sul (Fig. 8). Uma ampla área de significativa anomalia da pressão pode ser notada na Fig. 8b. No entanto, essa maior anomalia pode ser explicada pelo campo de pressão que apresenta valores mais elevados nesse mês devido ao posicionamento climatológico da Alta Subtropical do Atlântico Sul.

A convergência do escoamento é mais intensa sobre a região onde está posicionado o ciclone em superfície e percebe-se um cavado aprofundado já nesse nível mais a oeste, tanto no dia dos eventos quanto nos dias anteriores (Fig. 8).

Nos níveis médios (Fig. 9), ocorre a atuação de um cavado mais amplo, abrangendo desde o paralelo 45° S ao 15° S e de uma região de anomalia de vorticidade negativa mais significativa, tanto nos dias dos eventos quanto no dia anterior.

A difluência no escoamento em altitude provocada pelo posicionamento de um sistema de Alta Pressão e do cavado do Nordeste (esse último não muito bem confi-

gurado) é mais intensa no interior do país (Fig. 9). No entanto, o escoamento apresenta-se mais expressivo que em outros meses e posicionado sobre o Sudeste e região oceânica adjacente. A combinação da convergência do escoamento em 850 hPa, cavado amplificado em 500 hPa e escoamento dos ventos mais intensos contribuem para explicar a formação da baixa pressão em superfície conforme ilustrado na Fig. 9a.

3.1.3. Análise por temporada específica

Nas figuras referentes às temporadas de outubro a abril, ilustram-se dois exemplos: o comportamento dos compostos no período out/2012 a abr/2013 e no período em que se observou uma frequência superior à média (27 contra 17), que é o período de out/2008 a abr/2009.

No primeiro exemplo (out/2012 a abr/2013), nota-se uma baixa pressão fechada próxima ao litoral do Sudeste do país e uma discreta área de anomalia de pressão ao nível médio do mar sobre o Oceano Atlântico Sul, como mostra a Fig. 10 (a) e (b). No nível de 850 hPa (Fig. 10c), nota-se a presença de um cavado próximo à região onde se formam

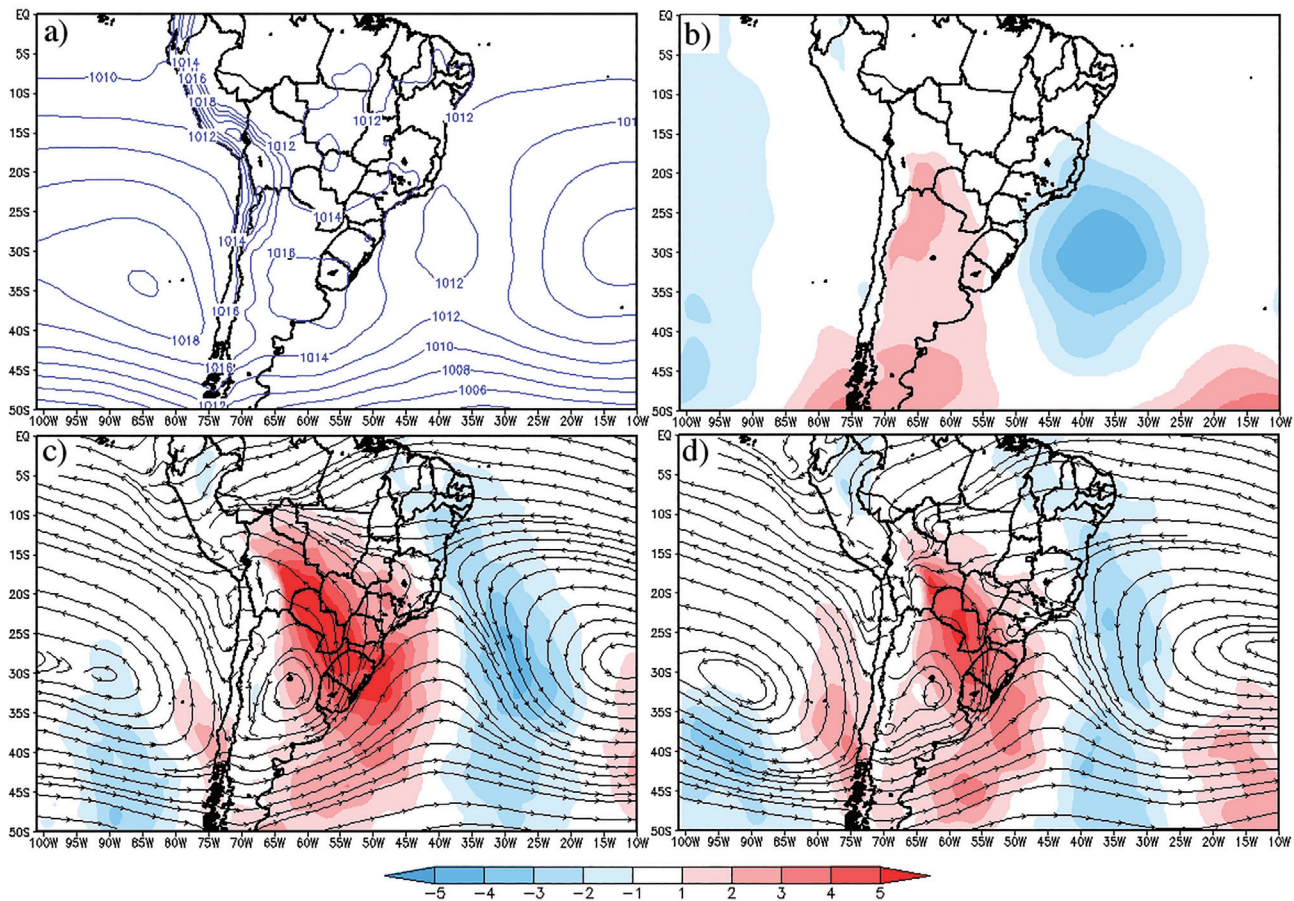


Figura 8 - a) Compostos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); b) Anomalia da Pressão ao Nível Médio do Mar(hPa); c) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa no dia e d) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa no dia anterior, para o mês de abril.

os ciclones em superfície, sem fechar uma baixa nesse nível. Em 500 hPa (Fig. 10d), um cavado se situa desde o Oceano Atlântico até parte do Sudeste do país, associado a uma área de anomalia negativa de vorticidade. No período a anomalia positiva do escoamento zonal em altos níveis foi mais intensa sobre o Centro-Sul do país. Além disso, houve significativa difluência do escoamento sobre parte do Sudeste do país, associada à Alta da Bolívia e ao Cavado do Nordeste (Fig. 10e), acarretando, por continuidade, na convergência do escoamento em superfície.

A combinação dos padrões observados no escoamento ao longo da coluna troposférica descritos anteriormente justifica a baixa pressão observada em superfície descrita pelos compostos do campo de pressão.

No segundo exemplo selecionado, em superfície, apresentaram isóbaras fechadas numa região bem próxima à costa das Regiões Sul e Sudeste do país, sobre parte do Atlântico Sul.

No nível de 850 hPa, nota-se uma convergência do escoamento bem pronunciado da Amazônia para a região onde se posiciona o ciclone, bem como escoamento vindo de latitudes mais altas pela circulação anticiclônica mais intensa que promove anomalias positivas no escoamento

sobre o Sul do país, no Uruguai, no Paraguai e nordeste da Argentina, também em direção ao Oceano Atlântico na costa do Sul e Sudeste do país.

Nos níveis médios, observa-se amplo cavado desde o Oceano até o Centro-Sul do país, bem como áreas de anomalias negativas do campo de vorticidade relativa.

Em altitude, as anomalias positivas da componente zonal do vento ficaram mais posicionadas sobre o centro-sul do país, mais próxima, portanto, da região ciclogênica observada em superfície. No entanto, se compararmos com outras temporadas, como por exemplo, out/2006 a abr/2007 e out/2009 a abr/2010 (figuras não apresentadas neste artigo mas disponíveis em Rocha, 2014) as anomalias positivas da componente zonal do vento ficaram mais afastadas, sobre o Pacífico e parte da Argentina. Nota-se também a difluência do escoamento que induz a convergência de massa em baixos níveis esteve associada ao posicionamento dos sistemas meteorológicos Alta da Bolívia e Cavado do Nordeste que esteve bem pronunciado, como mostra a Fig. 11.

Importante ressaltar que o comportamento nos diversos níveis comentado anteriormente bem como as características típicas do período de elevada radiação solar

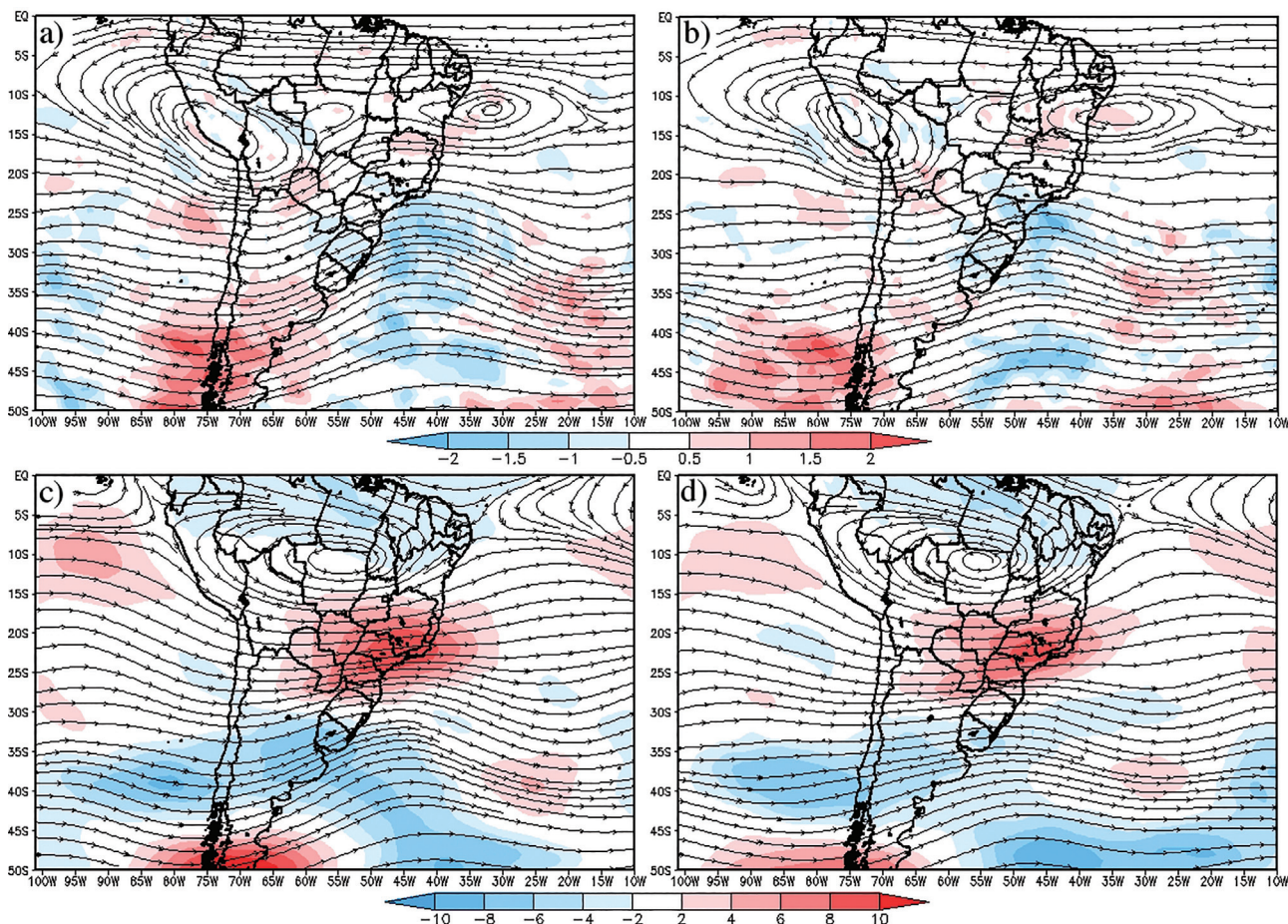


Figura 9 - a) Compostos de Linhas de Corrente(m/s) e anomalia de vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 500 hPa no dia; Compostos de Linhas de Corrente(m/s) e anomalia de vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 500 hPa no dia anterior; c) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa no dia e d) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa no dia anterior (d), para o mês de abril.

incidente e elevada umidade disponível, incentivou a convergência de umidade para a formação de ciclogêneses mais abundantes o período de out/2008 a abr/2009, em consonância com estudo de Reboita (2009) que destaca que nas ciclogêneses próximas ao Sul/Sudeste do país, a umidade é fundamental e, nas regiões ciclogênicas clássicas na desembocadura do Rio da Prata no Uruguai e no sul da Argentina, a contribuição principal é de cavados transientes em níveis superiores que se deslocam do Pacífico e influência da topografia. Também reforça o entendimento exposto por Hoskins e Hodges (2005) que constataram que é provável que a maioria dos eventos de ciclogêneses em baixos níveis esteja associada a ondas preexistentes na média e na alta troposfera e que a influência da orografia e a liberação de calor latente podem ser fatores importantes no processo de ciclogênese em baixos níveis na região subtropical.

3.1.4. Estudo de caso - Precipitação intensa na região Serrana do Rio de Janeiro

Um caso relevante que foi escolhido para validação do método objetivo de identificação de ciclones e análise de

padrões de circulação foi o desastre natural ocorrido na Região Serrana do Rio de Janeiro em 11-12/jan/2011. O grande volume de chuva (por exemplo, 180 milímetros em Nova Friburgo, segundo dados do INMET), a saturação do solo e a vulnerabilidade da região provocaram o transbordamento de rios e córregos e deslizamentos de encostas, causando a morte de 905 pessoas e outras desaparecidas de acordo com a Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro.

A sequência de cartas de superfície no período de 10/01/2011 12Z a 13/01/2011 00Z (Fig. 12, também disponíveis em Rocha, 2014), mostra a formação inicial de um sistema de baixa pressão próxima ao litoral de São Paulo e do Rio de Janeiro e sua gradativa intensificação e afastamento da costa. Esse sistema contribuiu para a organização de um canal de umidade sobre as Regiões Sudeste e Centro-Oeste do país e, posteriormente, a formação de um sistema frontal sobre o oceano. Esses sistemas combinados levaram à ocorrência de chuvas localmente fortes em áreas do Sudeste e grandes acumulados de chuvas sobre a Região Serrana do Rio de Janeiro.

O comportamento de algumas variáveis meteorológicas a partir de dados da Reanálise do ERA-Interim está

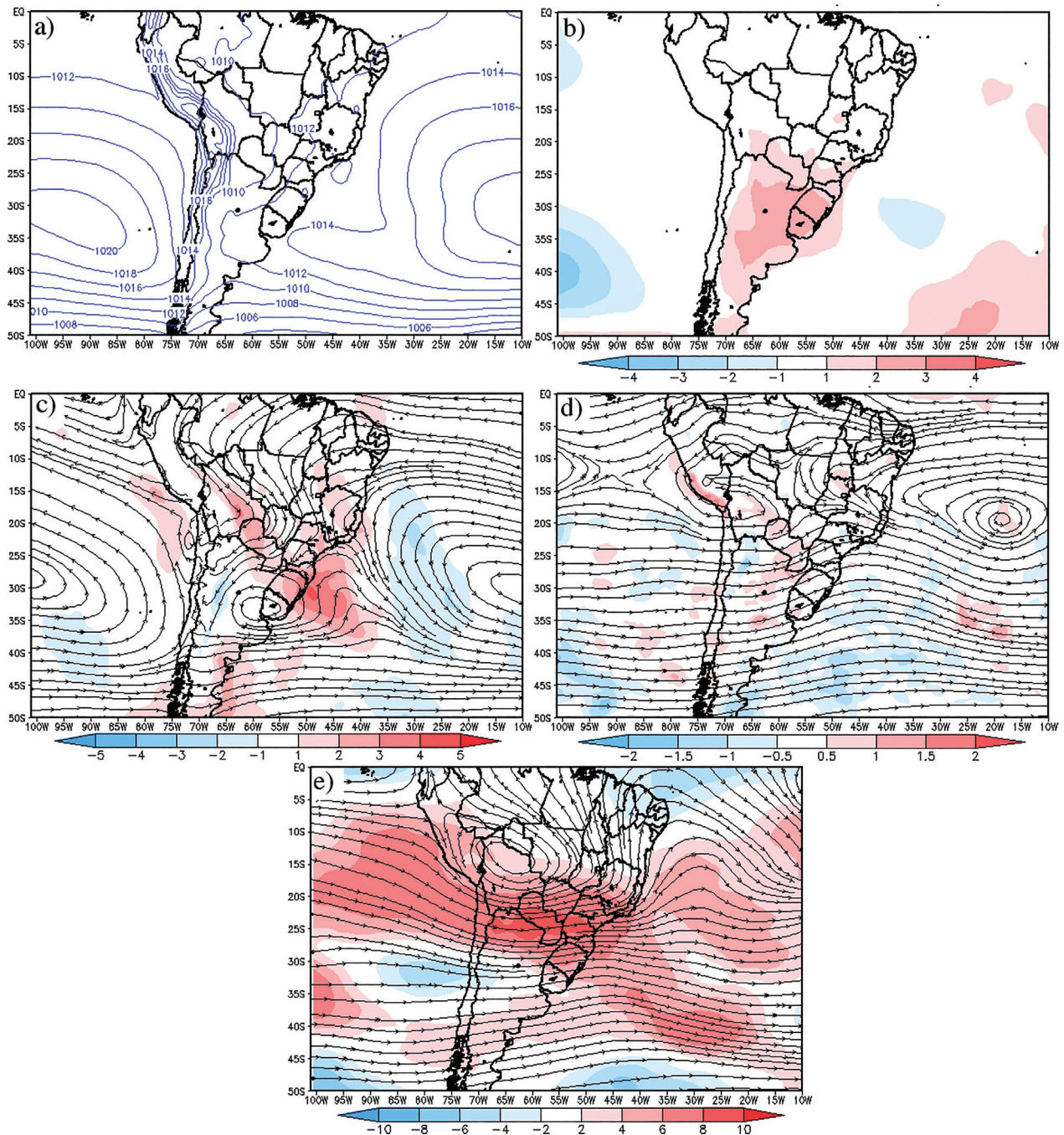


Figura 10 - a) Compostos de Pressão ao Nível Médio do Mar(hPa); b) Anomalia da Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); c) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa; d) Linhas de Corrente(m/s) e anomalia de vorticidade relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 500 hPa e e) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa (e) para a temporada de out/12 a abr/13.

disponível em Rocha (2014), cabendo ressaltar aspectos sinóticos:

A convergência dos ventos e de umidade em 850 hPa no Atlântico Sul, com circulação ciclônica bem definida nas sequências de datas nesse nível;

A vorticidade e linhas de corrente em 500 hPa apresentaram valores negativos de vorticidade na posição da baixa, denotando circulação ciclônica;

A difluência do escoamento em 250 hPa sobre o Atlântico Sul, derivado do posicionamento dos sistemas meteorológicos Alta da Bolívia e cavado do Nordeste favoreceu a convergência de massa em superfície e a atividade convectiva. Por outro lado, o forte escoamento dos ventos em altitude sobre o Sul do país e Oceano adjacente sinalizou a presença de correntes de jato;

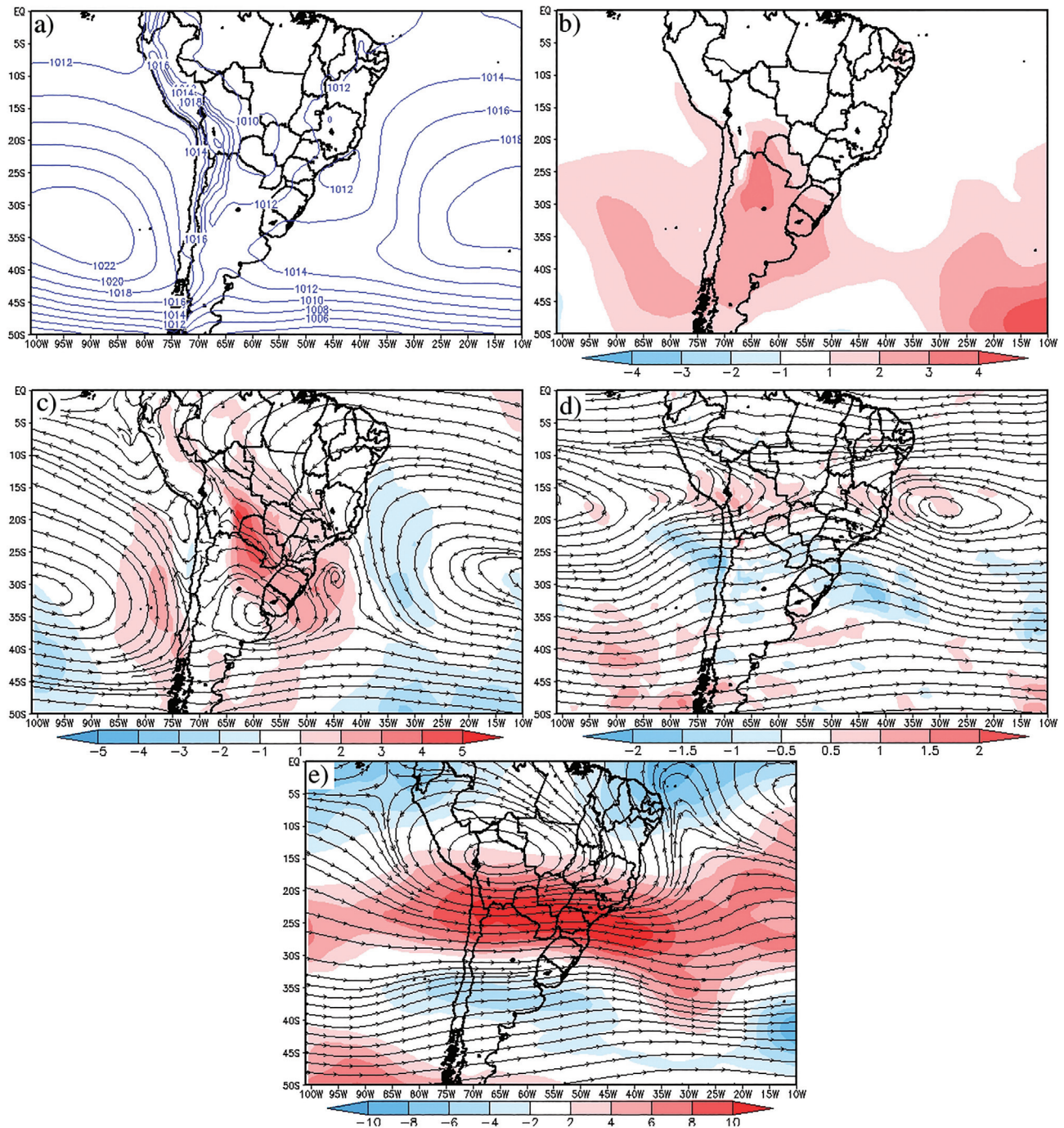


Figura 11 - a) Compostos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa); b) Anomalia da Pressão ao Nível Médio do Mar(hPa); c) Linhas de Corrente e anomalia da componente meridional do vento (m/s) em 850 hPa; d) Linhas de Corrente (m/s) e anomalia de vorticidade relativa ($10^{-5} s^{-1}$) em 500 hPa e e) Linhas de Corrente e anomalia da componente zonal do vento (m/s) em 250 hPa, para a temporada de out/08 a abr/09.

Foi verificada uma ampla área de baixa pressão, com isóbaras fechadas, em superfície.

A formação e fechamento da baixa pelos critérios objetivos, plotada na Fig. 13 apresentou boa correspondência no posicionamento, deslocamento e intensidade, comparando com as cartas sinóticas elaboradas pelo INPE/CPTEC.

No entanto, como descrito em Rocha (2014), neste estudo de caso, notou-se deficiência do Modelo Numérico Regional de Previsão de Tempo ETA 20 km utilizado no CPTEC/INPE em prever o fechamento da baixa pressão próximo ao litoral do Rio de Janeiro. De igual forma, o modelo americano GFS (*Global Forecast System*), também apresentou limitações graves na previsão de 24, 48 e 72 h para esse evento.

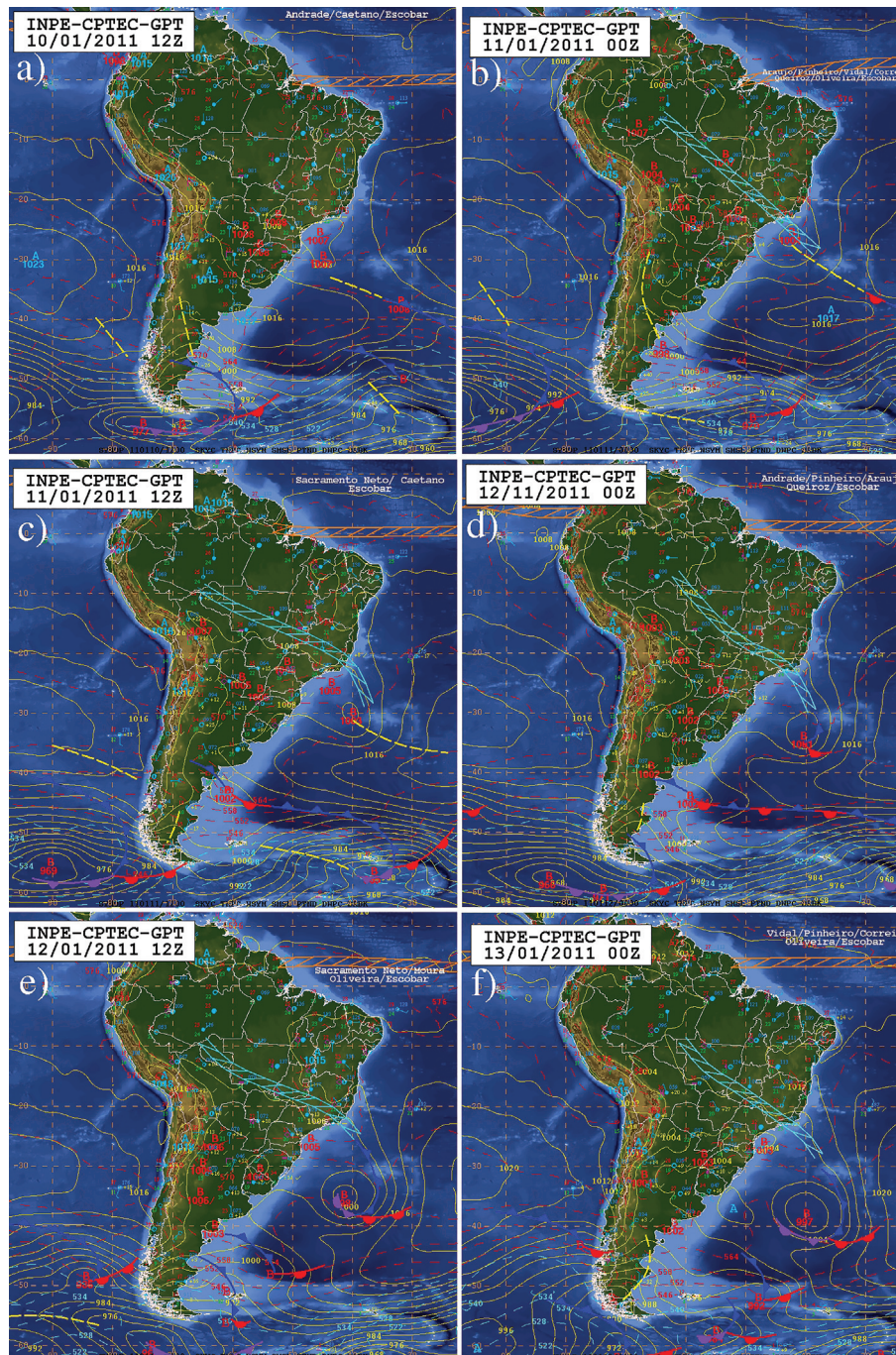


Figura 12 - Sequência de cartas de superfícies de 10/01/11 12Z a 13/01/11 00Z com intervalos de 12 h. Fonte: INPE/CPTEC (2013).

4. Conclusões

Neste trabalho utilizou-se um método objetivo para identificar os ciclones que se formam na costa do Sul e do Sudeste do Brasil. Os ciclones foram contabilizados, e uma técnica de composição aplicada às principais variáveis meteorológicas nos casos selecionados foi utilizada para caracterizar climatologicamente esses sistemas.

O número total de casos de ciclones foi de 169 na região e período de estudo, o que corresponde a uma média

aproximada de 17 casos por temporada outubro/abril. O tempo de vida dos ciclones dentro da área de estudo variou, sendo de pelo menos de 24 h e chegando, em alguns casos, a oito dias. No que se refere à intensidade, se destaca os ciclones de número 101 (dez/2009) e 110 (abr/2010), que apresentaram valores do mínimo de pressão inferiores a 1000 hPa e a 990 hPa, respectivamente.

No entanto, no período de out/2008 a abr/2009 a frequência de ciclones ficou acima da média (27 contra 17)

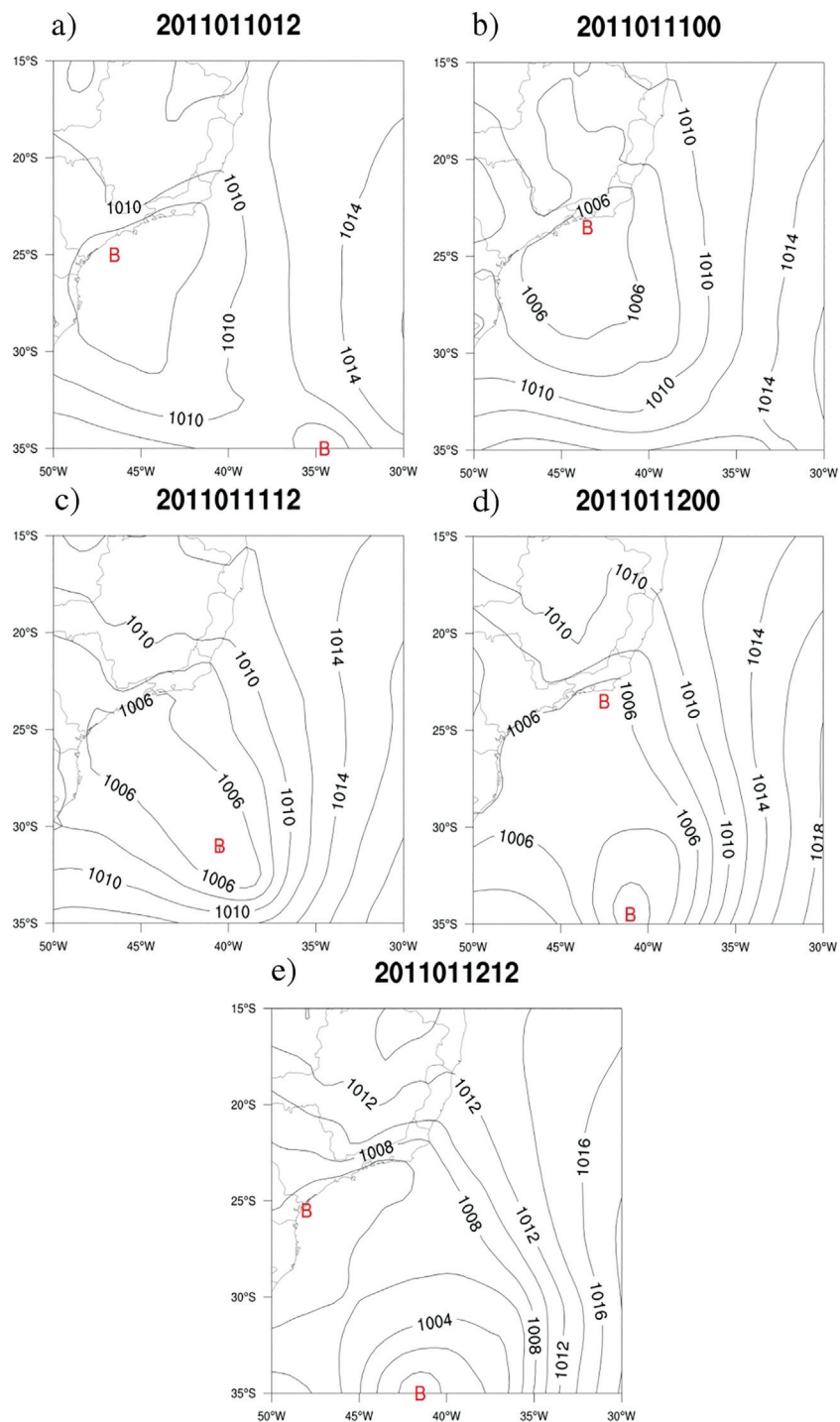


Figura 13 - Mínimos de Pressão segundo critério objetivo marcados pela letra B e campo de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa) a partir da Renálise do ERA-Interim: a) 10/01/11 12 UTC; b) 11/01/11 00 UTC; c) 11/01/11 12 UTC; d) 12/01/11 00 UTC e e) 12/01/11 12 UTC.

e pode estar associada mais às forçantes termodinâmicas mais evidentes neste período, com a circulação atmosférica favorável à presença de cavados em níveis médios e altos, além da presença da Alta da Bolívia, refletindo em áreas de convergências de umidade e episódios de ZCAS. Assim, os efeitos combinados de cavados em níveis médios e altos e a liberação de calor latente resultante da intensa convecção

característica das áreas de convergência de umidade, podem ter levado a um número mais expressivo de ciclones na área de estudo.

Na análise dos compostos, considerando o período total de outubro a abril de 2003 a 2013, notou-se que o comportamento do escoamento em altitude com difluência no escoamento provocado pela atuação da Alta da Bolívia e

pelo Cavado do Nordeste e das anomalias positivas do vento zonal, aliado à presença de cavado em níveis médios sobre Atlântico que transporta vorticidade ciclônica para a região do Oceano Atlântico Sul e à convergência de umidade em baixos níveis e consequente liberação de calor latente, justificam a ciclogênese em superfície.

Por fim, o estudo de caso mostrou boa representação dos ciclones usando os critérios desenvolvidos, que contempla técnicas objetivas. Ressaltou ainda a dificuldade de modelos numéricos de previsão em prever com maior exatidão a localização e a intensidade dos ciclones.

Como trabalhos futuros, pretende-se aplicar a meteorologia utilizada operacionalmente, aperfeiçoando de forma objetiva a previsão de tempo, podendo, inclusive, ser utilizada nos resultados das previsões numéricas sazonais. Adicionalmente, outra aplicação seria na análise da habilidade dos modelos de previsão numéricas em prever os ciclones através de índices de acerto na detecção dos ciclones nos diversos prazos de previsão. A relação entre as ciclogêneses na região estudada e o ENSO também é passível de estudos mais aprofundados.

Referências

- AHRENS, C.D. **Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere**. 4. ed. Belmonte, CA, EUA: Brooks/Cole, 2005.
- ANTHES, R.A. **Tropical cyclones: their evolution, structure and effects**. Meteorol. Monogr., v. 19, Boston, Mass: American Meteorological Society, 1982.
- BEVEN, J.L. **A study of three 'hybrid' storms**. In: CONFERENCE ON HURRICANES AND TROPICAL METEOROLOGY, 22., 1997, Fort Collins. **Proceedings** Fort Collins, CO. Boston, Mass: American Meteorological Society, 1997.
- BITENCOURT, D.P.; QUADRO, M.F.L.; GAN, M.A.; ACEVEDO, O.C.; FUENTES, M.V.; MUZA, M.N.; RODRIGUES, M.L.G. **Relating winds along the Southern Brazilian coast to extratropical cyclones**. Meteorological Applications (Print) , v. 18, p. 223-229, 2011.
- CARDOSO, C.S.; BITENCOURT, D.P.; MENDONÇA, M. Comportamento do vento no setor leste de Santa Catarina sob influência de ciclones extratropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2012, v.27, n.1, p. 39-48. ISSN 0102-7786. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862012000100005>.
- CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. (Orgs). **Tempo e Clima no Brasil: Ciclones e Ciclogêneses**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- CELEMIN, A. **Meteorologia Prática**. Mar del Plata: Edición del Autor, 1997.
- DEE, D.P., UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Bulletin of American Meteorological Society** , v. 137, p. 553-597, 2011.
- GAN, M.A.; RAO, V.B. Surface cyclongenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1293-1302, 1991.
- GUIA, C.V.F. **Análises das características sinóticas das trajetórias dos ciclones extratropicais que atuam na América do Sul e vizinhanças**. 120 p. (sid.inpe.br/mtcm19/2010/11.26.17.17-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011 Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38LS7UE>. Acesso em: 30 abr. 2014
- GRAY, W. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, v. 96, p.669-700, 1968.
- HART, R.E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, p.585-616, 2003.
- HOSKINS, B.J.; HODGES, K.I. A new perspective on southern hemisphere storm track. **Journal of Climate**, v. 18, p. 4108-4129, 2005.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Análise Sinótica**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/faces/noticias.jsp?idConsulta=&idQuadros=142>, Acesso em 10.05.2013.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Análise de Eventos Extremos**. Disponível em <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/>. Acesso em: 10.05.2013.
- MENDES, D.; SOUZA, E.; TRIGO, I.; MIRANDA, P. On precursors of south a american cyclogenesis. **Tellus**, v. 59, p. 114-121, 2007.
- MURRAY, R.J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, p. 155-166, 1991.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). El Nino - Souther Oscillation (ENSO). Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml> . Acesso em: 20.05.2014.
- PEZZA, A.B.; SIMMONDS, I. The first south Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L15712, doi:10.1029/2005GL023390, 2005.
- PEZZA, A.B.; AMBRIZZI, T. Variability of Southern Hemisphere Cyclone and Anticyclone Behavior: further analysis. American Meteorological Society. **Journal of Climate**, v. 16, p. 1075-1083, 2003.
- QUADRO, M.F.L.; DIAS, M.A.F.S.; HERDIES, D.L.; GONÇALVES, L.G.G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152-162, 2012.
- REBOITA, M.S.; IWABE, C.M.N.; ROSMERI, P.R.; AMBRIZZI, T. Análise de um ciclone semi-estacionário na costa sul do Brasil associado a bloqueio atmosférico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 407-422, São Paulo, 2009.
- ROCHA, F.R. **Estudo de caso de dois ciclones tropicais no Oceano Atlântico Sul. Monografia (Bacharelado em Meteorologia)** - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

- ROCHA, F.R. **Estudo de ciclones e de padrões de circulação atmosférica no oceano Atlântico Sul próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil usando dados da reanálise do ERA-Interim.** (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.21.33-TDI). **Dissertação (Mestrado em Meteorologia)** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5M5DB>.
- SANDERS, F. Real Front or Baroclinic Trough? **American Meteorological Society**, v. 20, p. 647-651, 2005.
- SIMMONS, A. UPPALA, S.; DEE, D.; KOBAYASHI, S. New ECWMF reanalysis products from 1989 onward. **ECWMF NEWSLETTER**, v. 110, p. 29, 2007.
- SINCLAIR, M.R. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. **American Meteorological Society**, v. 12, p. 595-612, 1997.

All the contents of this journal, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution License CC-BY.